

心理学における 3次元視研究の動向 —2002—

3-Dimensional Perception: 2002 Research Trends

林 部 敬 吉

Keikichi HAYASHIBE

抄録：視覚心理学における3次元視研究の2002年の動向を、両眼立体視、運動要因による3次元視、眼筋的要因による3次元視、絵画的要因による3次元視、奥行距離知覚に分類して報告した。とくに、両眼立体視の研究領域では、空間周波数による検出過程から視差検出を統合する過程にいたる階層的な処理を施されて成立することが明らかにされ、視差検出から立体視復元にいたる神経生理学的研究で着実な進展がみられる。

Abstract: The papers of 3-dimensional visual perception in 2002 were reviewed in the fields of depth from motion cue, stereoscopic vision, pictorial cues and virtual reality. Especially, it is evaluated that a functional hierarchy of binocular processing toward global disparity detection in the visual area V1 and V2 was suggested from the electrophysiological recordings of single-unit data.

1. はじめに

本報告には、心理学における3次元視知覚の研究論文を、Psychological Abstract誌の2002年版から抽出し、両眼立体視、運動要因による3次元視、眼筋的要因による3次元視、絵画的要因による3次元視、奥行距離の知覚に分類して紹介した。文献抽出は、DIALOGの文献検索システムを利用し、検索語はDistance Perception, Depth Perception, Stereoscopic Visionである。

2. 両眼立体視

2.1. 継時的立体視

(sequential stereopsis)

継時的立体視とは、Enright (1996) によって発見されたもので、その方法は、図1に示されたような装置を使用する。これを用いると、左右眼それぞれで観察するターゲット（きめの細かいテクスチャ面）の一方を注視すると他方の対象は周辺視のため空間解像度の閾値以下となり、他方を注視すると一方の空間解像度はその閾値以下となり、同時には両方の対象を見ることはないが、この時、左右の対象の注視を交互に変えると立体視が生じるというものである (Enright, J.T. 1996)。

閾値以下となり、したがって、同時には両方の対象を見ることはないが、この時、左右の対象の注視を交互に変えると立体視が生じるという

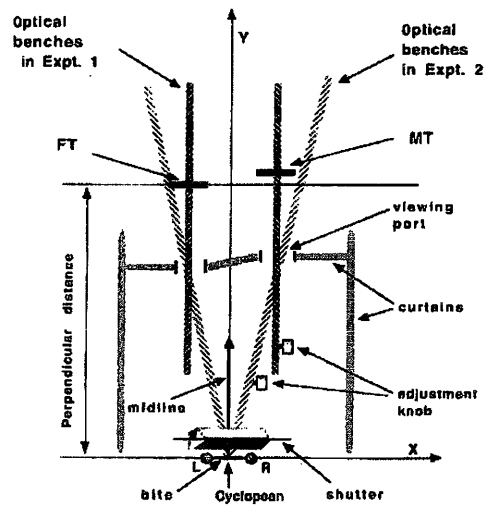


図1

継時的立体視のしくみ。左右眼それぞれで観察するターゲット（テクスチャ面）の一方を注視すると他方の対象は周辺視のための空間解像度の閾値以下となり、他方を注視すると一方の空間解像度はその閾値以下となり、同時には両方の対象を見ることはないが、この時、左右の対象の注視を交互に変えると立体視が生じるというものである (Enright, J.T. 1996)。

ものである。この継時的立体視力は、左右の対象が同時に見える同時的立体視と同等である。このような場合、残像の効果が疑われるが、注視点を交代させたときに見えるパターンがアイコニックメモリでのイレーザーとして作用して残像を消すと考えられている。

Taroyan, et al. (19) は, Enright と同一の方式を用いて継時的立体視の実験を行ったところ、頭部を前後、左右、上下に運動させると、立体視力が向上すること、2つの対象を共に正中線の片方に配置しても良い結果が得られること、一方の対象を正中線上に固定し、他方の対象を前後に移動してそれとのマッチングを求めると、フィートミューラー円（両眼と視対象の3点を通る円周）に類似した曲線が得られることなどが明らかにされた。Enright によれば、この継時的立体視は、ターゲット間に生じる正確な等輻輳の特性を持つサッケード眼球運動によって可能となるが、Taroyan, et al の結果はこれを支持していない。

2.2. 垂直視差の奥行効果

3種類の垂直視差の奥行効果の程度がBerends & Erkelems (2) によってしらべられた。3種類の垂直視差とは、図2に示されたように、垂直軸に関する左右ステレオグラム間の視差の取り方の相違による。ゼロ次元の変形とは、垂直軸に関し、単純に左右ステレオグラム間に一定の差を導入したものであり、また、1次元の変形とは、垂直軸に関し、ある勾配を持って差を導入したもの（Scale条件）と、これに水平軸の位置による変形を導入したもの（Shear条件）であり、さらに2次元の変形には、Scale条件、Shear条件に視差勾配を導入したもの（Quadratic Scale条件、Quadratic Shear条件）、および垂直方向に加え、水平方向にも視差勾配を導入した混合条件（Quadratic Mix条件）とがある。垂直視差によって生じた奥行方向への傾きの測定は、水平視差を操作して、その傾きをゼロにする方法（Null

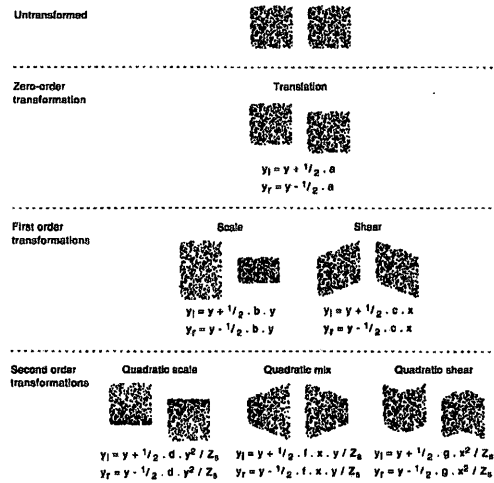


図 2

3種類の垂直視差。ゼロ次元の変形とは垂直軸に関し単純に左右ステレオグラム間に一定の差を導入したものの、また、1次元の変形とは垂直軸に関し、ある勾配を持って差を導入したもの（Scale条件）と、これに水平軸の位置による変形を導入したもの（Shear条件）とがあり、さらに2次元の変形には、Scale条件、Shear条件に視差勾配を導入したもの（Quadratic Scale条件、Quadratic Shear条件）、および垂直方向に加え、水平方向にも視差勾配を導入した混合条件（Quadratic Mix条件）とがある（Berends, E.M. & Erkelens, C.J. 2001）。

Method) で行われた。その結果、垂直視差の奥行効果は、Shear条件でもっとも安定して出現したが、Scale条件とQuadratic Mix条件では個人差が大きいことが示された。また、垂直視差ステレオグラムの立体視には、垂直視差と眼筋信号との間に抗争が生じることで、この抗争の度合いが個人差の大きな原因となっていると考えられる。

2.3. 両眼立体視におけるトランジェントな処理過程

両眼立体視には、トランジェントな処理過程（transient processing）とサステインドな処理過程（sustained processing）とがあり、前者は短時間の刺激提示に際して生起し、後者は比較的長い刺激提示で生起する。また、前者は視かけの奥行の有無のみの情報を与え、後者はどの程度の奥行が視えるか、その量を伝達すると言われている。

る (Ogle 1952). Edwards, et al. (6) は, 1次と2次の刺激を使用して両眼立体視におけるトランジェントな処理過程をしらべた. 1次刺激とは輝度あるいは色相における差で規定された刺激を指し, 2次刺激とは輝度あるいは色相の変化によって規定されたもので, コントラストあるいはテクスチャパターンを指す. 実験の結果, (1) 視かけの奥行は1次と2次の両方の刺激から生じること, (2) 片眼に1次刺激, 他眼に2次刺激を提示しても視かけの奥行は成立すること, などが明らかにされた. このことから, 両眼立体視のトランジェントな過程では, 1次と2次刺激から成立した刺激の両方が処理されていて, しかも立体視が成立する前に, これらの刺激はプールされると考えられる.

2.4. 両眼立体視検出のためのニューロン

大局的両眼立体視を検出するニューロンは, Poggio, et al. (1985) によってはじめて視覚領域で見いだされた. 当初, この種のニューロンは正しい対応点を検出し, 誤った対応点は除くものと考えられた. しかし, V1 視覚野のニューロンは誤った対応点も検出していることが明らかにされた (Cumming & Parker, 1997). V1 でのニューロンは立体を出現させない視差を検出していることを示唆し, 立体視には直接には対応をもたないものと考えられた.

V1 領域の局所的立体視の検出に関するニューロンは, 空間周波数特性を持つことである. とくに, これらの検出器は, マカクやフクロウを対象にした研究によれば, ガボール関数でモデル化できる単眼受容野の組み合わせでよく説明できることが示された (Ohzawa, et al. 1990, Nieder & Wagner 2000). 局所的立体視の視差検出器は, 空間周波数特性をもつことから, 視差の関数として周期的に反応する. したがって, 視差に同期した曲線は, 複数の空間周波数が統合された後にもある頂点をもつので, 異なる距離にある奥行面を信号することができる (図

3-c).

それでは, 両眼立体視を全体として処理する中枢の過程は, どこに存在するのであろうか. 多分, 両眼立体視は空間周波数による検出過程から視差検出を統合する過程にいたる階層的な処理を施されて成立すると考えられる.

Nieder & Wagner (13) は, フクロウを対象として, 明るさ極性が同一の対応ステレオグラム

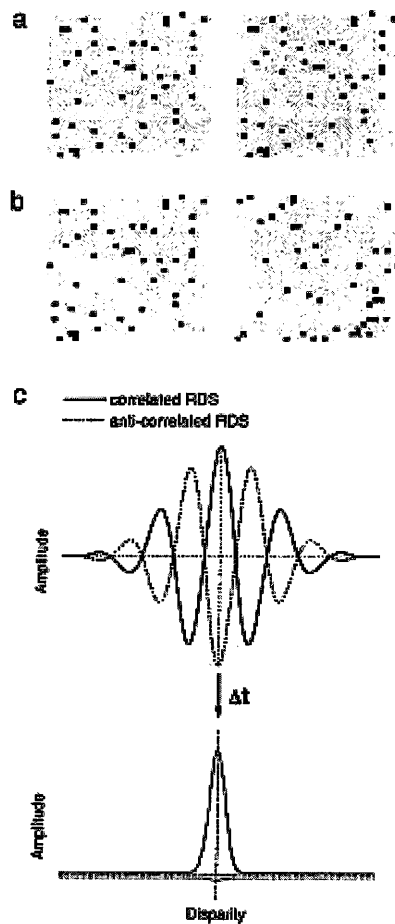


図 3

(a): 対応ステレオグラム (correlated stereogram). (b): 非対応ステレオグラム (anticorrelated stereogram), ステレオグラムの左右の要素は明るさが反対で構成されている. (c): 局所的立体視の視差検出器は, 空間周波数特性をもつことから, 視差の関数として周期的に反応する. 次いで上位の処理過程が介入 (Δt) し, 視差に同期した曲線は, 複数の空間周波数が統合されて, 異なる距離にある奥行面を信号する (Nieder, A. & Wagner, H. 2001).

(correlated stereogram, 図3-a)と反対明るさ極性を持つ非対応ステレオグラム (anticorrelated stereogram, 図3-b)を提示したときの、視覚前脳部 (Visual Wulst)にある52個のニューロンの応答を測定した。その結果、ニューロンの反応遅延の増大は、非対応ステレオグラムに対する反応強度の減少と相関していることが明らかにされた。同時に、視差変化に対応するニューロン反応頻度の2番目のピークの抑制が反応遅延とともに増大すること、さらに視差に同期した曲線は反応遅延とともに促進することも見いだされた。このことから、両眼立体視の対応問題を解決するには、視差検出を全体的に統合する上位の領域の関与が示唆されている。

両眼立体視では、両眼視差量に応じて出現する奥行量に変化するが、これに対応した神経機構はいまだ明らかにされていない。最近の神経生理学の研究によれば (Ohzawa,1998), 第1視覚野 (V1)の両眼視差に選択的なニューロンは、それらの受容野に投影された視差量を計算していると考えられている。このことが可能なためには、単一のニューロンが左右のステレオグラムの対応問題を解決していなければならない。もし、両眼視の受容野に投影されたステレオグラムの部分が正しい対応点をもつならば、正しい視差量が計算できるが、誤った対応点をもつならば、誤った視差量計算がなされてしまうことになる。しかし、視覚心理的には誤った視差量に基づく視かけの奥行が出現することはない。一方、視差に選択的に応答するニューロンは、奥行を出現させない反対明るさ極性を持つ非対応ステレオグラム (anticorrelated stereogram)にも応答することが知られている (Cumming & Parker, 1997)。この場合、その神経インパルス発射強度は対応ステレオグラムの場合より強くはない。このことは、V1領域ではステレオグラムから知覚的に出現する全体的な奥行構造とそのステレオグラムの局所的視差構造とが相互に無関係に反応していると仮定される。これを検証するために、Cumming & Parker⁽⁵⁾は、図4に示

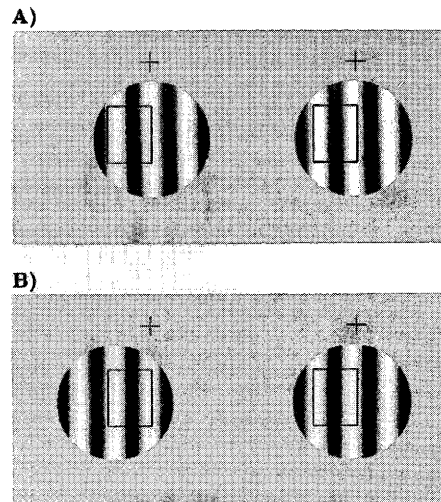


図4

サイン波形の明るさ変化を持つ要素図形から構成されたステレオグラム。受容野と想定された領域 (四角で囲まれた部分)の視差は、A、Bとも同一であるが、Aでは円形部分が凝視点の前方に、Bでは後方に出現する (Cumming,B.J. & Parker,A.J. 2001)。

されたステレオグラムを用意した。ここでは、受容野と想定された領域 (四角で囲まれた部分)の視差は、A、Bとも同一であるが、Aでは円形部分が凝視点の前方に、Bでは後方に出現する。このステレオグラムを両眼立体視させたときの2頭のマカクのV1野の単一ニューロン117個が測定された。その結果、大多数のニューロンは、受容野での視差が等しいが、その立体出現方向の異なるA、Bのステレオグラムで等しい反応を示した。同時に、マカクの立体出現方向が精神物理学的に観察されたが、ここでは、A、Bのステレオグラムが規定する交差あるいは非交差視差にそった立体視が出現していて、神経生理学的反応とは一致しないことが示された。このことから、両眼立体視の奥行出現は、より上位の視覚中枢が関与することを示唆する。

2.5. 反対明るさ極性を持つ非対応刺激 (anticorrelated stimuli) における両眼立体視と運動視

明るさについての極性が相反する非対応刺激

からなるキネマトグラムを継時的に提示すると、刺激が支持する方向とは逆方向の運動が観察されるが、非対応ステレオグラムでは両眼立体視は生じない。しかし、ステレオグラムを構成する画素を少なくすると正しい方向への立体出現が起きる一方 (Cogan, et al. 1995) で、画素濃度を濃くすると、立体出現は生じなくなる (Cumming et al. 1998)。神経生理学的には、前述したように、視差に選択的に応答するニューロンは、奥行を出現させない非対応ステレオグラムにも応答することが知られている (Cumming & Parker, 1997)。このように、反対明さ極性を持つ非対応ステレオグラムに対して、なぜ立体視が生じないかは謎となる。

Read & Eagle⁽¹⁴⁾ も、1次元と2次元の帯域通過型の刺激からなるステレオグラムとキネマトグラムとを作成し、立体出現方向と運動方向とをしらべた。その結果、前者の刺激に対しては、弱いながらも刺激が指示するのは反対方向の立体と運動が報告された。一方、後者の刺激については、立体視は生起せず、運動視は促進することが示された。両眼視差の検出は水平方向のみの左右差 (1次元の差) に限定されるが、運動の検出はあらゆる方向の運動の検出が必要となり2次元的である。この結果は、両眼立体視における対応問題には、異なった方向チャンネルからの情報がどのようにして対応問題の解決に関わるかという問題を新たに提起している。

2.6. 両眼立体視の学習過程と脳波による部位変化

ダイナミック・ランダム・ドット・ステレオグラム (DRDS) の学習時における脳部位の変化が脳波で捉えられた (Skrandies & Jedynak⁽¹⁸⁾)。測定部位は脳の頭頂部から後頭部である。測定は、DRDSを両眼立体視閾値の65%で反復提示し、正しい奥行判断がほぼ成立するまで行われた。その結果、学習をほぼ達成した被験者では、視覚領における脳波の活動の中心が左脳から右脳に移動すること、学習を達成できなかった者

にはこのような移動がみられないことが明らかにされている。

2.7. サルの視覚領におけるRDS両眼立体視の形状の検出

Heydt, et al.⁽⁷⁾ は、両眼立体視時におけるマカクの視覚領 (V1とV2) の単一ニューロンの働きをしらべた。使用したステレオグラムは、フィギュラル・ステレオグラムとランダム・ドット・ステレオグラム (RDS) である。その結果、(1) V1領域の受容野では、両眼視差に対して広く反応が出現すること、(2) V2領域の受容野は、両眼立体視したときに生じる形状に選択的に応答すること、(3) 同時に、これらのV2領域の受容野は、コントラスト縁の位置や方向に応答すること、(4) さらに、これらの受容野は、ステレオグラムの面と対象間に生じる相対的視差量 (奥行量) に対しても選択的に応答すること、などが明らかにされた。これらの結果から、両眼立体視で生じる縁 (エッジ) は、V2領域で検出されていることが明瞭となっている。

2.8. ランダム・ドット・ステレオグラムでの形状と奥行の選択的注意時の事象関連電位

ランダム・ドット・ステレオグラムの単眼観察では、形状と奥行の両方とも出現しないが、両眼観察するとその両方が、同時に出現する。この際、形状と奥行がそれぞれ独立した過程で処理されて生起するのか、あるいはどちらかが他に随伴して生じるのかは明らかではない。Kasai & Morotomi⁽⁹⁾ は、図5に示すような実験パラダイムでこの問題に迫った。実験では、形状 (F、縦矩形と横矩形の2種類) と奥行 (D、交差と非交差の2種類) の2つの知覚事象のうち、その両者に注意させるか、どちらか一方に注意させるかの選択的注意を被験者に求め、その間の事象関連電位を測定した。もし、両要因が随伴的な過程処理を受けているならば、次のような結果がでると予想される。すなわち、奥行要因が

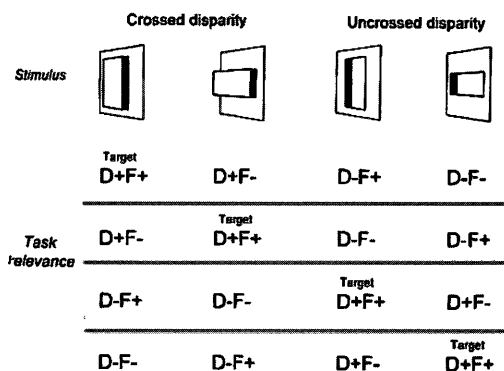


図5

RDSでの形状と奥行の選択的注意時の事象関連電位測定のための実験パラダイム。実験では、形状 (F, 縦矩形と横矩形の2種類) と奥行 (D, 交差と非交差の2種類) の2つの知覚事象のうち、その両要因に注意させるか、どちらか一方に注意させるかの選択的注意を被験者に求め、その間の事象関連電位を測定した。(+)印は選択的注意を取らせる、(-)印は取らせないことを指す (Kasai T. & Morotomi, T. 2001)。

形状要因に依存して生じるならば ((D+F-)-(D-F-)), 奥行関連事象電位はゼロとなると予想される。一方、奥行要因が形状要因とは独立に生じていれば ((D+F-)-(D-F-)) = ((D+F+)-(D-F+)), 奥行関連事象電位は形状関連事象とは関係なく出現すると考えられる。測定の結果、後者の仮説が支持され、奥行と形状要因は独立した過程でそれぞれ処理された後、ひとつの対象に知覚的に統合されると考えられる。

2.9. RDS と DRDS における両眼立体視の傾き出現程度

Allison & Howard⁽¹⁾ は、RDS と DRDS での両眼立体視における面の傾き知覚についてしらべた。面の傾き知覚は、水平軸 (X軸) と奥行軸 (Z軸) について測定された。ステレオグラムは、スタティックな RDS とダイナミックな RDS で、それぞれのステレオグラムで 20° と 40° の面の傾きが提示され、マッチング法で測定された。その結果、測定された立体距離は、RDS より DRDS の方が大きいことが示された。これは、RDS 条

件ではパースペクティブ要因が立体出現を弱める働きをしているため、と考えられた。そこで、両眼視差とパースペクティブ要因とが抗争的条件下で、立体出現量を測定したところ、RDS では DRDS より抗争効果が顕著に表れることが示されている。

2.10. 両眼視差の知覚的誘引と反発

2個あるいはそれ以上の対象を中心窩に投影してその視えの奥行距離を測定すると、対象間の2次元距離が小さいときには、知覚的誘引が生じて両眼視差が小さくなり、逆に対象間の2次元距離が大きときには、知覚的反発が生じて視差が大きくなることが明らかにされている (Westheimer & Levi 1987)。Mikaelin & Qian⁽²⁾ は、これらの知覚的誘引と反発の神経生理学的モデルを考えた。それは、ガボール関数で記述された単純細胞の両眼受容野モデルから構成されたもので、1次元 (水平方向) と2次元 (水平と垂直方向) モデルが作られた。シミュレーション実験の結果は、精神物理学的測定結果をよく説明できること、さらに誘引から反発への変化距離は視差計算に用いられた単純型細胞の空間周波数と方向の分布の取り方で決まることが明らかにされている。

2.11. 両眼立体視力、運動検出閾、副尺視力におけるコントラスト・パドックス

両眼立体視の左右のステレオグラムの明るさコントラストを左右とも高めると、立体視力は改善するが、しかし、左右ステレオグラムの何れかだけに明るさコントラストを増強して左右間に明るさコントラストの差を導入すると、立体視力は悪くなる。これはコントラスト・パドックスと呼ばれる (Halpern & Blake 1988)。このような現象は、両眼立体視力以外にも生じていると Stevenson & Cormack⁽¹⁷⁾ は予想し、運動検出閾と副尺視力についても実験的に検討した。刺激パターンはガボール関数で作成され、高コ

ントラスト条件, 低コントラスト条件, そしてコントラスト差導入条件とが設定された (図 6). 測定は, 両眼立体視条件ではステレオグラムを提示して, 運動視閾条件では 149ms 間, 刺激を連続提示して, 副尺視力条件ではひとつの刺激パターンを上下に分離して提示して, それぞれ行われた. その結果, コントラスト・パラドックスが, 両眼立体視力, 運動視閾, 副尺視力において明瞭に出現した. また, それらにおけるコントラスト・パラドックスの出現には, 空間周波数条件が同一な場合に, 類似することも明らかにされた. このことから, コントラスト・パラドックスには, 両眼立体視力, 運動視閾, 副

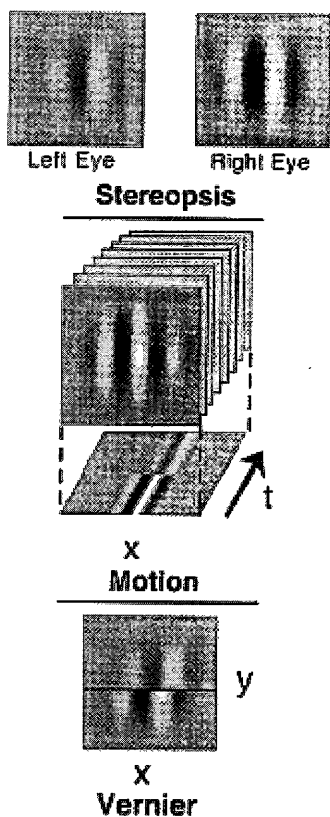


図 6

ガボール関数から作成した刺激パターン. 両眼立体視力測定条件ではステレオグラムを提示して, 運動視閾測定条件では 149ms 間, 刺激を連続提示して, 副尺視力測定ではひとつの刺激パターンを上下に分離して提示して, それぞれ行われた (Stevenson, S.B. & Cormack, L.K. 2000).

尺視力に共通するメカニズムが働いていて, それは視覚情報処理の初期過程で作用するコントラストの標準化処理に関係していると考えられる.

2.12 両眼立体視における左右眼像の不等圧縮の効果

ステレオグラムの左右画像は, 左右眼どちらか一方への画像に比較して 2 倍の情報量を含んでいる. もし, 過多の情報量があるのであれば, デジタルテレビ放送, インターネットとマルチメディア通信の領域では, この画像を適度に圧縮して伝達することも可能である. ステレオグラムでは, 左右眼像は水平方向の視差が異なるだけなので, 圧縮をかけやすい. 実際に, ステレオ視できるビデオでは, 「MPEG-2」方式で左右眼像に別々に圧縮をかけている. しかし, その圧縮率は 30% が限度である.

今回, Meegan et al. (10) は, ステレオグラム画像の一方だけに圧縮をかける方式で, 両眼立体視したときに, どの程度, 原画像が維持されるかをしらべた. 圧縮は低帯域のガウスフィルター (SD: 0.076-2.999) を使用してボケ (blur) を画像に導入する方式と, コサイン変形圧縮アルゴリズム (DCT) によるブロック化方式である. 圧縮は, それぞれの方式で 15 段階に設定された. マッチングの手続きは, 原画像と圧縮画像からなるステレオグラムと左右像とも非圧縮原画像から作成されたステレオグラムの両方を両眼立体視させながら, 圧縮率を連続的に可変させ, 非圧縮画像ステレオグラムとの等価点を求める方法によった. その結果, 片眼の画像にボケを導入したステレオグラムでは, 両眼立体視した場合に, 原画像ステレオグラムと同等の画質効果が得られたが, 片眼をブロック化したステレオグラムでは, 同等の画質効果が得られないことが明らかにされた. このことから, 片方のステレオグラムにボケを導入する圧縮方式は, 原画像ステレオグラムと同等の視覚心理的画質効果が得られるので有効である.

2.13. パヌムの極限事態における2重融合と方向視差

パヌムの極限事態では、片眼のステレオグラムに描かれた1本の線分と他眼のステレオグラムの2本線分の両方とが融合し、2本の線分間に奥行が生起する。Wang et al. (22) は、方向視差から構成されたパヌムの極限事態でも、同様な二重融合が生起するかを確かめた。図7の左側のステレオグラムは方向視差を持つパヌムの事態であり、右側は通常のステレオグラムである。通常のステレオグラムでは2本線分間に奥行が生起するが、左側のステレオグラムでは、左右とも左方向への斜線分（視差ゼロ）同士が融合するのみで、2重融合は生起しない。方向視差から構成されたパヌムの極限事態では、2重融合は成立しないことが確認されている。

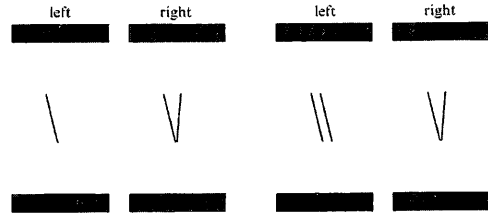


図7

図の左側のステレオグラムは方向視差を持つパヌムの事態、図の右側は通常のステレオグラム (Wang, Z., Wu, X., Ni, R & Wang, Y. 2001)

2.14. 両眼立体視における奥行恒常性

カニザタイプの主観的輪郭から構成されたステレオグラムについて奥行恒常性がしらべられた (Vreven & Welch (20)). 両眼視差で出現する相対的奥行量は、観察距離の二乗に反比例する。しかし、視えの相対的奥行量は、そのような減少を示さず、恒常を維持する (奥行恒常性)。視覚システムは、何らかの方法で、観察距離と視差量との関係を計算し補正した上で、相対的奥行量を決めていると考えられる。今回の実験では、図8に示されたように、観察距離を169.4cmから193cmまで5段階に設定し、それぞれの距離での対象の視えの相対的な奥行距離量を測定した。相対的な奥行距離は、カニザタイプの輪郭図形を湾曲させ、手前に凸になるような視差を付けて出現させた。視えの相対的な奥行量は、湾曲凸面のトップとボトム間の距離とし、別に提示した同一カニザパターンのステレオグラムの視差量を変化させマッチングさせた。その結果、観察距離が長いと視えの相対的奥行距離量は小さくなり (湾曲が小さくなること)、奥行恒常性が生起しないことが示された。実線輪郭によるカニザパターンでも同様な結果が示され

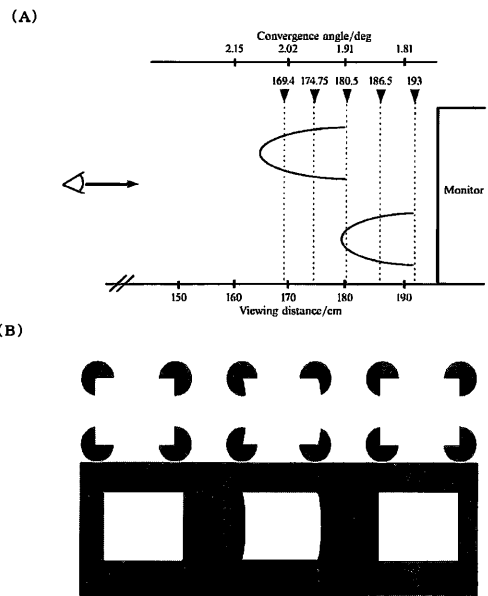


図8

(A) 奥行恒常性の実験設定。観察距離を169.4cmから193cmまで5段階に設定し、それぞれの距離での対象の視えの相対的な奥行距離量を測定。 (B) カニザタイプの主観的輪郭と実線輪郭からなるステレオグラム (Vreven, D. & Welch, L 2001)。

ている。

3. 運動要因による3次元視

3.1. 3次元形状の復元に与えるパースペクティブ要因と加速度要因

運動要因からの形状の復元問題では、どんな

手がかりが形状の復元に関係しているか、またどのような特性を持つ形状が復元されるかが問われている。計算論の立場からの分析は、2つの正射影像からは、理論的に一意的な形状は復元できないとされる (Ullman 1979)。形状の復元に関係する手がかりは、形状に関係し正射影像に矛盾しない手がかりと考えられる。Hogervorst & Eagle⁽⁸⁾ は、パースペクティブ要因と加速度要因とが、3次元形状の復元にどの程度関与するかを楔形図形でしらべた。図9は、楔形を平面に垂直においた図形 (A, B) であり、C, Dは楔形を垂直軸に反転させたときのシミュレーションである。C, Dの図の中で、黒い単線は最初の位置から中間の位置までの回転を表し、白い単線は中間の位置から最後の位置までの回転を示す。形状復元のためのシミュレーションは、パースペクティブ投影と正射影投影条件で作成され、被験者には楔形の視えの角度についてのマッチングを、両眼立体視でこれとは別に提示した図形の角度を調整させる方法でおこなった。楔形は垂直軸に対して反転させるが、その際、楔形図形の大きさ、反転角度、回転の加速度、楔形の角度

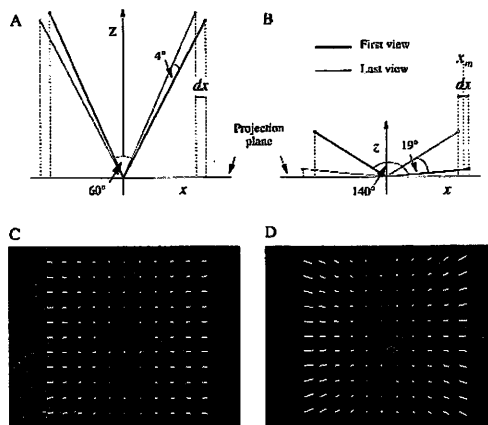


図9

運動要因からの形状の復元に使用したパターン。AとBは楔形を平面に垂直においた図形であり、C, Dは楔形を垂直軸に反転させたときのシミュレーションである。C, Dの図の中で、黒い単線は最初の位置から中間の位置までの回転を表し、白い単線は中間の位置から最後の位置までの回転を示す (Hogervorst, M.A. & Eagle, R.A. 2000)。

も操作された。その結果、パースペクティブ要因は比較的図形が小さいときに (視角 8°) 効果が高いこと、また加速度要因は形状復元の知覚を容易にすることが明らかにされている。

3.2. 3次元シーン内の3次元物体の大きさ (奥行次元) 知覚

3次元シーンの異なる奥行距離に位置させた対象の視かけの大きさ (奥行次元) が⁹, Sauer, et al.⁽¹⁶⁾ によってしらべられた。3次元シーンはドットでシミュレートした床面と天井面が構成され、その間に測定対象として異なる奥行距離 (2.3, 34.9, 79.2m) にあるポールに取り付けられた円筒形のシリンダーが配置された。操作した奥行要因は、運動視差とパースペクティブで、それぞれの要因は単独でシーンを構成した。対象の視かけの大きさ (奥行次元) は、観察者からみて垂直に置かれたシリンダーの直径の大きさをマッチング法で測定された。その結果、対象までの奥行距離が増大するにつれ対象の視かけの大きさは小さくなること、シリンダーに回転を与えることによって対象中心的記述情報を増大すると、運動視差条件では、回転速度が高いほど対象の視かけの大きさは増大することなどが明らかにされている。

4. 眼筋的要因による3次元視

4.1. 近距離での奥行距離知覚

20cmから120cmの範囲内におかれた対象の視かけの奥行距離が測定された (Viguier et al.⁽²¹⁾)。奥行手がかり条件は、両眼視差と両眼輻輳に限定された。その結果、両眼視差と両眼輻輳がともに働く条件では、きわめて正確な距離知覚がなされた。しかし、両眼視差を除去し両眼輻輳要因に限定した条件では、40cm以下の距離では、距離知覚は正確になされたが、60cmを超えると過小視が生じた。また、観察者と対象との間の距離の半分、1倍、2倍の距離を見積もらせると、自己を実際の位置から10.4cmの位置に想

定して距離評価をしていること、さらに両眼輻輳角度と距離知覚とは密接な関係を持つことも明らかにされた。このことから、腕の長さの範囲内の距離では、両眼輻輳は有効な奥行き手がかりである。

5. 絵画的要因による3次元視

5.1. 5月齢乳児と8月齢乳児の主観的輪郭図形の知覚

5月齢乳児と8月齢乳児が主観的輪郭図形の中に奥行き関係を知覚しているかがしらべられた(Csibra⁽⁴⁾)。実験に使用された図形は矩形が出現するカニザパターンで、奥行き関係の知覚は、主観的輪郭図形の背後、あるいは前面にアヒルを移動させ、その時の注視時間反応を測定することで検討された。アヒルを主観的輪郭図形の背後で移動させる条件では、アヒルは一度背後に隠れ、次いで再度反対側に出現する。一方、主観的輪郭図形の前方でアヒルが移動する条件では、アヒルは常に乳児に見える。8月齢乳児にあつては、注視時間はアヒルが背後に隠れ、次いで現れる条件で有意に長くなるが、5月齢乳児ではこのような差は生じなかった。このことから、8月齢乳児は主観的輪郭図形を物体を隠せるリアルな対象として知覚していることを示す。

6. 奥行き距離知覚

6.1. バーチャル・リアリティ空間における奥行き距離知覚

視覚システムには2系統が分類される。Godale & Milner (1992)によれば、知覚システムと知覚-行為システム(perception-action system)である。知覚システムは、それが何であるかに気がつき、描写できる働きを持ち、知覚-行為システムは、行為を導く働きを持ち、対象を意識することや対象の記述能力は持たない。知覚システムは知覚のゆがみに関係し、知覚-

行為システムは、知覚の正確さに関係する。これまでの奥行き距離知覚研究の多くは、観察者に受動的に対象を観察させて知覚判断を求めたが、知覚システム2系統説によれば、観察者に能動的に反応させる方法をとることが必要となる。

Bingham, et al.⁽³⁾は、現実空間とバーチャル・リアリティ空間とで奥行き距離判断の正確さをリーチング法によってしらべた。操作した奥行き手がかりは、眼球調節要因、オクルージョン要因、両眼視差要因である。その結果、現実空間と人工現実空間とでは、奥行き距離判断に相違が生じないこと、ただ、バーチャル・リアリティ空間では、眼球調節が固定されているので、知覚対象が固定された眼球調節距離より遠くにある場合には、対象までのリーチングに誤差が出現し、修正する必要が生じた。現実空間とバーチャル・リアリティ空間の両方で、対象をリーチング法で測定する場合、フィードフォワードが重要な要因であることが示された。

6.2. オプティク・フローによる奥行き知覚

ミツバチは、花の密までの位置を知るのにオプティク・フローを利用する(Srinivasan et al. 1997, 2000)。人間の奥行き距離知覚においても、オプティク・フローは対象までの奥行き距離、方向、位置を特定するのに重要な働きをしている。では人間もミツバチと同様に、オプティク・フローのみで対象まで到達することが可能であろうか。Redlick, et al.⁽¹⁵⁾は、バーチャル・リアリティの技法を利用して、人工的な廊下空間を作成し、そこに設定されたドアまでオプティク・フローを操作することで到達できるかを実験した。バーチャル・リアリティ空間はヘッド・マウント・ディスプレイに提示され、ベクション(観察者自身の視かけの運動)はオプティク・フローを提示することで生起させた。このようにすると、あたかも観察者は廊下を移動するような感覚を生じさせることができる。実験では、廊下に設置された対象を一度提示し、次に対象を消して、

ベクションを起こし、対象までのオプティク・フローの提示時間を求めることで知覚的奥行距離をしらべた。その結果、一定速度のオプティク・フローの場合で、その速度が遅い場合には(1.6 m/s以下)、視えの奥行距離の過大視が起き、対象をはるかに行き過ぎてしまうこと、またオプティク・フローを加速させた場合には、0.1m/s²の条件でもっとも正確な位置特定ができること、などが明らかにされている。

6.3. 地面と対象間の構造から規定された奥行距離知覚

自然空間内にある様々な対象は、それが置かれた地面との間で知覚的に構造化されているとともに、それらは相互に関連し合って存在している。とくにGibson, J. (1950)は、奥行距離知覚においては、観察者と対象の間に存在する連続した面が重要な規定要因であることを明らかにした。そこで、コンピュータでシミュレートした自然空間においても、対象とそれが置かれた面との構造が奥行距離知覚を規定するかが試された(Meng & Sedgwick⁽¹¹⁾)。シミュレートされた空間は、地上面に台形のプラットフォームが置かれ、その上に立方体が載せられたものである。プラットフォームは16mの長さがあり(横幅1.5m)、観察者から見て縦長に置かれた。その上に一辺が40cmの立方体が載せられ、その立方体までの奥行距離知覚がマッチング法で測られた。単眼観察が採用されたので、奥行手がかりは、絵画的要因と連続する面から発するテクスチャ要因のみである。知覚対象と地上面との構造は、対象と観察者の間の俯角を一定に保ちながら、プラットフォームの厚みを減じることで、地上面とプラットフォームとの間に間隙を挿入する方法で変えられた。測定の結果、地上面とプラットフォーム間の間隙が増大するほど奥行知覚距離は知覚対象である立方体が直接地面に置かれた状況と等しくなり、対象までの距離が増大し不正確になることが明らかにされた。このことから、奥行距離知覚においては、知覚対

象(立方体)とそれが置かれた物体(プラットフォーム)、そしてそれらが存在する地面との間の知覚的構造関係が重要であることが明らかにされている。

7. おわりに

本年度は、3次元視に関する研究は、例年に比較して少なく、とくに、運動要因に関する3次元視研究に、それが顕著に現れている。これは、運動視差に関する研究、運動要因からの立体の復元に関する研究、ステレオキネティックの研究など、ひとわり分析され、次への展開が頓挫しているためであろう。

両眼立体視に関する研究は、例年と同様に、多くの研究が行われた。それらの知見をまとめると、(1)垂直視差の奥行効果は、Shear条件でもっとも安定して出現したが、Scale条件とQuadratic Mix条件では個人差が大きいこと、また垂直視差ステレオグラム立体視には垂直視差と眼筋信号との間に抗争が生じ、この抗争の度合いが個人差の大きな原因となっていること、(2)両眼立体視のトランジェントな過程では、1次と2次刺激から成立した刺激の両方が処理され、しかも立体視が成立する前にこれらの刺激はプールされること、(3)V1領域ではステレオグラムから知覚的に出現する全体的な奥行構造とそのステレオグラムの局所的両眼視差構造とが独立して反応しているため、一義的な両眼立体視を出現させるためには、これらを統合する上位の視覚中枢の関与が必要なこと、(4)V1領域の受容野では両眼視差に対して広く反応が出現、V2領域の受容野は両眼立体視したときに生じる形状に選択的に応答、同時にこれらのV2領域の受容野は、コントラスト縁の位置や方向に反応、さらに、これらの受容野はステレオグラムの面と対象間に生じる相対的視差量(奥行量)に対しても選択的に応答すること、これらの結果から両眼立体視で生じる縁(エッジ)はV2領域で検出されていること、(5)奥行関連事象電位は、形

状関連事象とは関係なく出現し、奥行と形状要因は独立した過程でそれぞれ処理された後、ひとつの対象に知覚的に統合されると考えられること、などである。

奥行距離の知覚研究の領域では、(1)現実空間とバーチャル・リアリティ空間とでは、奥行距離判断に相違が生じないこと、ただ、バーチャル・リアリティ空間では、眼球調節が固定されているので、知覚対象が固定された眼球調節距離より遠くにある場合には、対象までのリーチング（対象までの腕伸ばしによる測定）に誤差が出現し、修正する必要が生じること、さらに現実空間とバーチャル・リアリティ空間の両方で対象をリーチング法で測定する場合、フィードフォワードが重要な要因であること、(2)バーチャル・リアリティ空間でオブティク・フローによってベクション（観察者自身の視かけの運動）を誘導した場合、その速度が遅い場合には（1.6 m/s以下）、視えの奥行距離の過大視が起き、対象をはるかに行き過ぎてしまうこと、またオブティク・フローを加速させた場合には、0.1m/s²の条件でもっとも正確な位置特定ができること、などが明らかにされた。

8. 文献 (2002年)

- (1) Allison, R.S. & Howard, I.P. 2000 Stereopsis with persisting and dynamic stereopsis. *Vision Research*, 40, 3823-3827.
- (2) Berends, E.M. & Erkelens, C.J. 2001 Strength of depth effects induced by three types of vertical disparity. *Vision Research*, 41, 37-45.
- (3) Bingham, G.P., Bradley, A., Bailey, M. & Vinner, R. Accommodation, occlusion, and disparity matching are used to guide reaching: A comparison of actual versus virtual environments. *Journal of Experimental psychology: Human Perception and Performance*, 2001 27, 1314-1334.
- (4) Csibra, G. 2001 Illusory contour figures are perceived as occluding surfaces by 8-month-old infants. *Developmental Science*, 4:4, F7-F11.
- (5) Cumming, B.J. & Parker, A.J. Local disparity not perceived depth is signaled by binocular neurons in cortical area V1 of the macaque. *The Journal of Neuroscience*, 20, 4758-4767.
- (6) Edwards, M., Pope, D.R. & Schor, C.M. 2000 First- and second-order processing in transient stereopsis. *Vision Research*, 40, 2645-2651.
- (7) Heydt, R., Zhou, H. & Friedman, H.S. 2000 Representation of stereoscopic edges in monkey visual cortex. *Vision Research*, 40, 1955-1967.
- (8) Hogervorst, M.A. & Eagle, R.A. 2000 The role of perspective effects and acceleration in perceived three-dimensional structure-from-motion. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26, 934-955.
- (9) Kasai, T. & Morotomi, T. 2001 Event-related brain potentials during selective attention to depth and form in global stereopsis. *Vision Research*, 41, 1379-1388.
- (10) Meegan, D.V., Stelmach, L.B. & Tam, W.J. 2001 Unequal weighting of monocular inputs in binocular combination: Implications for the compression of stereoscopic imagery. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 7, 143-153.
- (11) Meng, J. & Sedgwick, H.A. 2001 Distance perception mediated through nested contact relations among surfaces. *Perception & Psychophysics*, 63, 1-15.
- (12) Mikaelian, S. & Qian, N. 2000 A physiologically-based explanation of disparity attraction and repulsion. *Vision Research*, 40, 2999-3016.
- (13) Nieder, A. & Wagner, H. 2001 Hierarchical processing of horizontal disparity information in the visual forebrain of behaving owls. *The Journal of Neuroscience*, 21, 4514-4522.
- (14) Read, J.C.A. & Eagle, R.A. 2000 Reversed stereo depth and motion direction with anti-correlated stimuli. *Vision Research*, 40, 3345-3358.

- (15) Redlick, F.P., Jenkin, M. & Harris, L.R. 2001 Human can use optic flow to estimate distance of travel. *Vision Research*, 41, 213-219.
- (16) Sauer, C.W., Sadpour, A., Braunstein, M.L. & Andersen, G.J. 2001 Perceived depth of 3-D objects in 3-D scenes. *Perception*, 30, 681-692.
- (17) Stevenson, S.B. & Cormack, L.K. 2000 A contrast paradox in stereopsis, motion detection, and vernier acuity. *Vision Research*, 40, 2881-2884.
- (18) Skrandies, W. & Jedynak, A. 1999 Learning to see 3-D: psychophysics and brain electrical activity. *NeuroReport*, 10, 249-253.
- (19) Taroyan, N.A., Buckley, D., Porrill, J. & Frisby, J.P. 2000 Exploring sequential stereopsis for coplanarity tasks. *Vision Research*, 40, 3373-3390.
- (20) Vreven, D. & Welch, L. 2001 The absence of depth constancy in contour stereograms. *Perception*, 30, 693-705.
- (21) Viguier, A., Clement, G. & Trotter, Y. 2001 Distance perception within near visual space. *Perception*, 30, 115-124.
- (22) Wang, Z., Wu, X., Ni, R. & Wang, Y. 2001 Double fusion does not occur in Panum's limiting case: evidence from orientation disparity. *Perception*, 30, 1143-1149.
- Cogan, A.I., Kontsevich, L.L., Lomakin, A.J., Halpern, D.L. & Blake, R. 1995 Binocular disparity processing with opposite-contrast stimuli. *Perception*, 24, 33-47.
- Cumming, B.G. & Parker, A.J. 1997 Responses of primary visual cortical neurons to binocular disparity without the perception of depth. *Nature*, 389, 280-283.
- Cumming, B.G., Shapiro, S.E. & Parker, A.J. 1998 Disparity detection in anti-correlated stereograms. *Perception*, 27, 1367-1377.
- Enright, J.T. 1996 Spatial stereopsis: a simple demonstration. *Vision Research*, 36, 307-312.
- Gibson, J.J. 1950 *The Perception of the Visual World*. Boston: Houghton Mifflin.
- Goodale, M.A. & Milner, A.D. 1992 Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neuroscience*, 15, 20-25.
- Halpern, D.L. & Blake, R.R. 1988 How contrast affects stereoacuity. *Perception*, 17, 483-495.
- Nieder, A. & Wagner, H. 2000 Horizontal-disparity tuning of neurons in the visual forebrain of the behaving owls. *Journal of Neurophysiology*, 83, 2967-2979.
- Ogle, K. 1952 On the limits of stereoscopic vision. *Journal of Experimental Psychology*, 44, 253-259.
- Ohzawa, I. 1998 Mechanisms of stereoscopic vision: the disparity energy model. *Current Opinion of Biology*, 8, 509-515.
- Ohzawa, I., Deangelis, G.C. & Freeman, R.D. 1990 Stereoscopic depth discrimination in the visual cortex: neurons ideally suited as disparity detectors. *Science*, 249, 1037-1040.
- Poggio, G.F. 1995 Mechanisms of stereopsis in monkey visual cortex. *Cerebral Cortex*, 3, 193-204.
- Srinivasan, M.V., Zhang, S. & Bidwell, N. 1997 Visually mediated odometry in honey bees. *Journal of Experimental Biology*, 200, 2513-2522.
- Srinivasan, M.V., Zhang, S., Altwein, M. & Tauts, J. 2000 Honeybee navigation: nature and calibration of the 'odometer'. *Science*, 288, 851-853.
- Ullman, S. 1979 *The interpretation of visual motion*. Cambridge, M.A.: MIT Press.
- Westheimer, G. & Levi, D.M. 1987 Depth-attraction and repulsion of disparate foveal stimuli. *Vision Research*, 27, 1361-1368.

(はやしべ けいきち 静岡大学情報学部教授)